

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ НА МІКРОГЕОМЕТРІЮ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ КРИВОЛІНІЙНИХ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ**V. Palaguta<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0008-5338-2416><sup>1</sup>Kamianske, Ukraine**INFLUENCE OF MACHINING PROCESS PARAMETERS ON MICROGEOMETRY DURING MILLING OF CURVED SHAPED SURFACES**

**Мета.** Теоретичне дослідження умов контакту різальних кромки кінцевих фрез зі сферичним торцем з криволінійною поверхнею деталей при фрезеруванні на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), визначення величини ефективного діаметра різальної кромки при обробці ділянок фасонних поверхонь які нахилені відносно осі фрези та оцінка впливу параметрів процесу обробки на розмір мікронерівностей обробленої поверхні.

**Методика.** Дослідження базується на застосуванні методів аналітичної геометрії при вивченні теоретичної геометричної моделі дотику кінцевих фрез зі сферичним торцем з криволінійними фасонними поверхнями деталей та впливу параметрів процесу обробки на мікрогеометрію фасонних поверхонь.

**Результати.** Встановлено взаємозв'язок між ефективним діаметром фрези та діаметром робочої частини фасонної фрези, глибиною різання, кроком між сусідніми проходами та кутом між віссю фрези та нормаллю до номінальної поверхні деталі. Отримані залежності величини залишкового гребінця на оброблюваних фасонних поверхнях від діаметра фрези та кроку між сусідніми проходами дають можливість призначати параметри обробки криволінійних поверхонь деталей з забезпеченням заданої шорсткості поверхні.

**Наукова новизна.** Визначено функціональні залежності для розрахунку ефективного діаметра різальної кромки кінцевої фрези зі сферичним торцем при фрезеруванні ділянок фасонних поверхонь що нахилені відносно осі фрези та отримано формули для визначення висоти залишкового гребінця.

**Практична значимість.** Обробка криволінійних поверхонь деталей з урахуванням кута нахилу між віссю фрези та нормаллю до номінальної поверхні деталі в точці їх контакту дозволяє обробляти деталі належної якості та точності з мінімальними витратами. Наведені формули для розрахунку ефективного діаметра на різальній кромці кінцевої фрези дають нагоду технологу встановлювати доцільну частоту обертання шпинделя при призначенні оптимальної для даних умов фрезерування швидкості різання яка рекомендується виробником інструментів.

**Ключові слова:** криволінійна поверхня, кінцева фреза, радіусна різальна кромка, ефективний діаметр фрези, шорсткість поверхні, висота гребінця, стратегія формоутворення.

**Вступ.** Застосування оброблюваних центрів з ЧПК дає змогу з високою продуктивністю, точністю, повторюваністю та нормованою шорсткістю оброблюваних поверхонь деталей виконувати фрезерні операції обробки деталей машин та механізмів типового та спеціального призначення з криволінійними фасонними поверхнями, а також з поверхнями вільної форми.

Криволінійні фасонні поверхні деталей до яких відносяться увігнуті поверхні, що нагадують чашу або поглиблення і поверхні вигнуті назовні знаходять застосування в деталях прес-форм для лиття виробів з пластиків або гуми, штампів, лопатках турбін двигунів, автомобільних компонентах та задаються 3D-моделями за допомогою CAD – систем [1].

Математична модель криволінійних поверхонь деталей які створені прямими та твірними лініями повинна надати можливість застосування відомих стратегій та шаблонів фрезерування для генерування фінішних траєкторій обробки із заданою точністю та якістю оброблюваної поверхні.

Широке застосування в різних галузях промисловості знаходять деталі, що являють собою сукупності геометричних тіл у складі площин і поверхонь другого порядку – циліндрів, конусів, сфер, еліпсоїдів, гіперболоїдів та параболоїдів (рис. 1, а), а також деталі з поверхнями вільної форми (рис. 1, б).

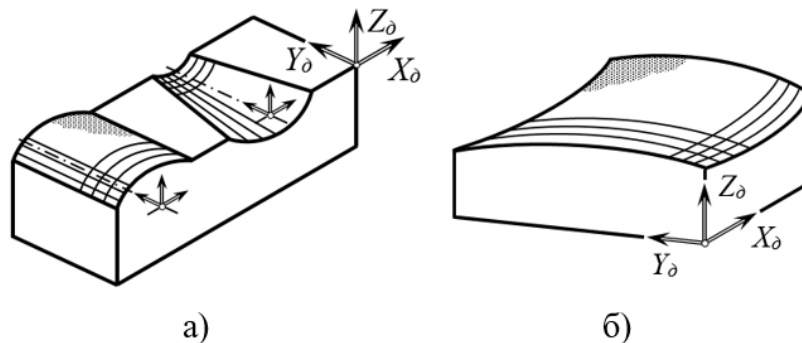


Рис. 1. Криволінійні поверхні (а) та поверхні вільної форми (б) деталей

Деталі з криволінійними поверхнями мають складну геометричну форму, до якої висуваються особливі вимоги щодо точності розмірів, розташування та форми і якості поверхонь [2, 3]. Одна з важливих експлуатаційних характеристик деталей є шорсткість поверхні, яка впливає на довговічність та зносостійкість поверхонь, корозійну стійкість і міцність з'єднань з натягом [4].

**Основна частина.** Шорсткість поверхні деталі залежить від методу обробки, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, жорсткості технологічної обробної системи, геометрії та якості інструментів, призначених режимів обробки (швидкості різання, подачі, глибини різання, кроку рядка між сусідніми проходами), а також від використання мастильно-охолоджувальних середовищ.

Кінематичні можливості верстатів з ЧПК дозволяють обробляти криволінійні фасонні поверхні зі стабільною якістю, але шорсткість поверхні також залежить від геометричної складової умов контакту різальної кромки з профілем заготовки та випадкової динамічної характеристики процесу різання (сил різання, вібрації, технічного стану верстата, відтиснення фрези тощо) [5, 6].

При технологічній підготовці процесу обробки криволінійних поверхонь деталей розрізняють такі етапи: проектування деталі та заготовки, аналіз можливості обробки, вибір конструкції кінцевих фрез, призначення режимів різання та стратегії відносних переміщень деталі і інструменту (рис. 2).

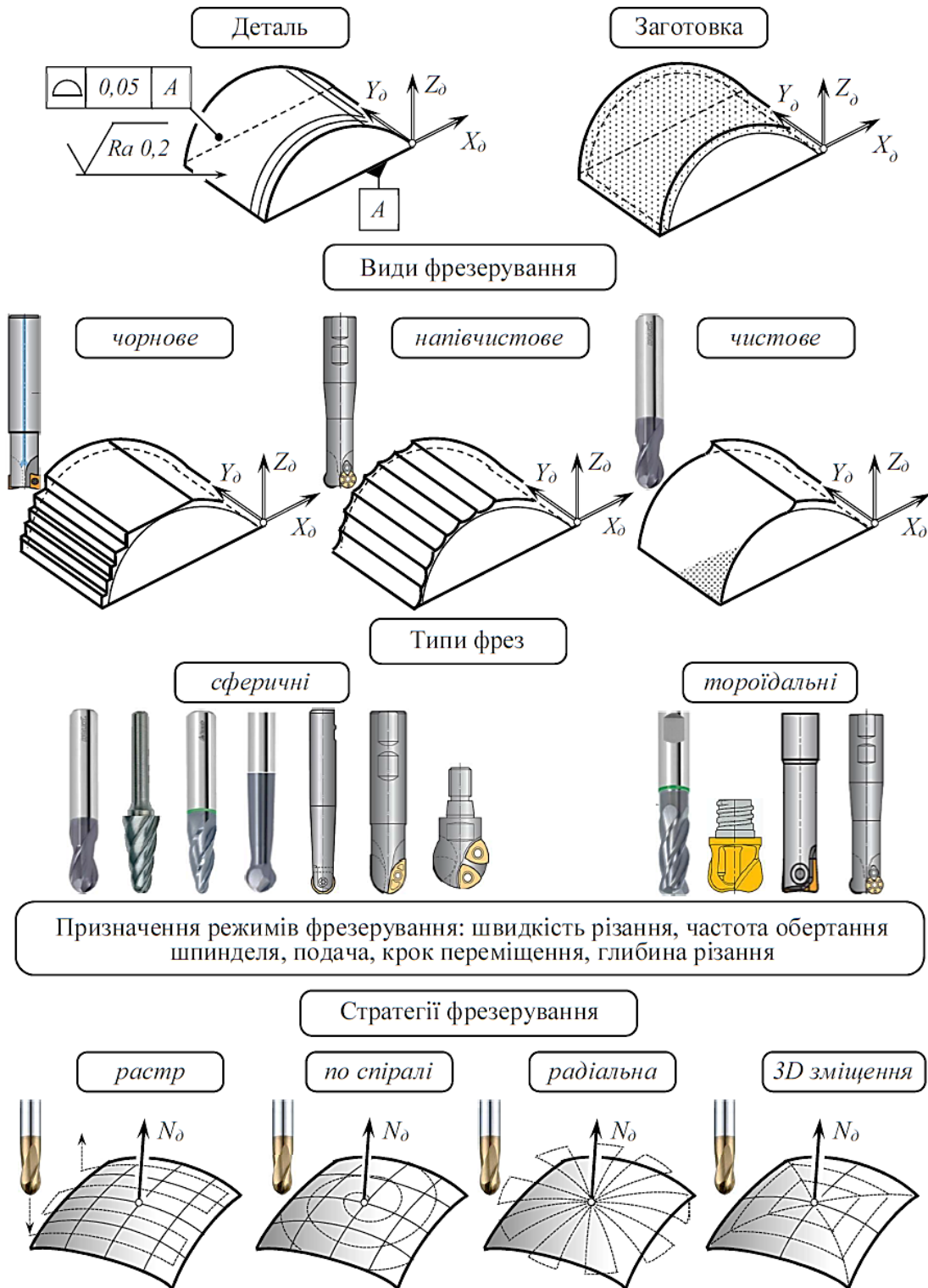


Рис. 2. Етапи технологічної підготовки фрезерування деталей з криволінійними фасонними поверхнями

На першому етапі технологічної підготовки виробництва розробляється цифрова CAD-модель деталі, яка визначає криволінійні номінальні поверхні, заокруглення між суміжними ділянками для забезпечення безперервності та відсутності зламів. На базі створених поверхонь деталі формується 3D-модель заготовки з призначеними припусками для подальшої обробки.

Аналіз вимог креслення, геометрії САД-моделі деталі та заготовки здійснюється для визначення можливості умов фрезерування, виду обробки, вибору верстата, розподілу припуску між операціями, призначення інструментів, що використовуються та встановлення режимів фрезерування.

Процес обробки поверхонь криволінійної форми включає три кроки: чорнове і чистове фрезерування та шліфування або полірування [7]. Операція чорнового фрезерування дозволяє з максимальною продуктивністю видалити основний припуск та характеризується значними силами різання. На поверхні залишаються високі гребінці і для їх згладжування доцільно ввести напівчистову операцію. Чистова обробка здійснюється за стратегією та режимами різання, що забезпечують отримання висоти гребінця на поверхні деталі не вище ніж зазначений на кресленні параметр шорсткості. Якщо цього при чистовому фрезеруванні досягти неможливо або економічно недоцільно, то застосовують шліфування або полірування поверхні деталі. За оцінками чистова обробка, шліфування та полірування досягає до 78% машинного часу виробництва.

Фрези для обробки криволінійних фасонних поверхонь та поверхонь вільної форми деталей на верстатах з ЧПК конструктивно поділяються на сферичні та тороїдальні що обумовлює їх сферу застосування.

Кінцеві фрези зі сферичним торцем, який утворений радіусними різальними кромками, або збірної конструкції оснащеної твердосплавними пластинами найбільш придатні для обробки криволінійних фасонних поверхонь. Але є обмеження діаметра кінцевої фрези якій залежить від радіуса кривизни поверхні.

Тороїдальні кінцеві фрези мають заокруглені кути та можуть використовуватися для чорнкової та чистової обробки особливо при малих радіусах поєднання суміжних ділянок криволінійних поверхонь.

Далі визначається стратегія фрезерування і САМ – система обчислює траєкторію взаємних переміщень деталі та інструменту. Для операцій чорнкової обробки критерієм оптимізації виступає машинний час, а при чистовій обробці – точність та якість обробленої поверхні, яка характеризується висотою залишкового гребінця на поверхні. Вплив стратегій фрезерування на шорсткість обробленої поверхні досліджено у роботі [8].

На вибір оптимальної траєкторії інструмента при фрезеруванні криволінійних поверхонь деталей впливає низка факторів, серед яких форма і кривизна оброблюваної поверхні, фізико-механічні властивості матеріалу заготовки, кінематичні та технологічні можливості верстата, орієнтація заготовки відносно системи координат верстата, тип і розмір інструментів та їх геометрична прохідність при профільній обробці деталей, досвід програміста та традиції виробництва.

Один з видів фінішної стратегії фрезерування фасонних ділянок деталей є растровий метод з переміщенням кінцевої фрези вздовж осі деталі  $X_0$  з кроком  $T$  який не перевищує  $0,5$  діаметра  $D$  робочої частини фасонної фрези. Паралельні траєкторії інструменту призводять до утворення великих гребінців на вертикальних поверхнях деталей або близьких до них увігнутих (рис. 3, а) та опуклих (рис. 3, б). Тому такий метод можна рекомендувати для обробки площин які перпендикулярні до осі фрези або пологих поверхонь з кутом між віссю фрези та

нормаллю до номінального профілю деталі при якому висота  $h$  залишкових гребінців не перевищує встановленого параметра шорсткості.

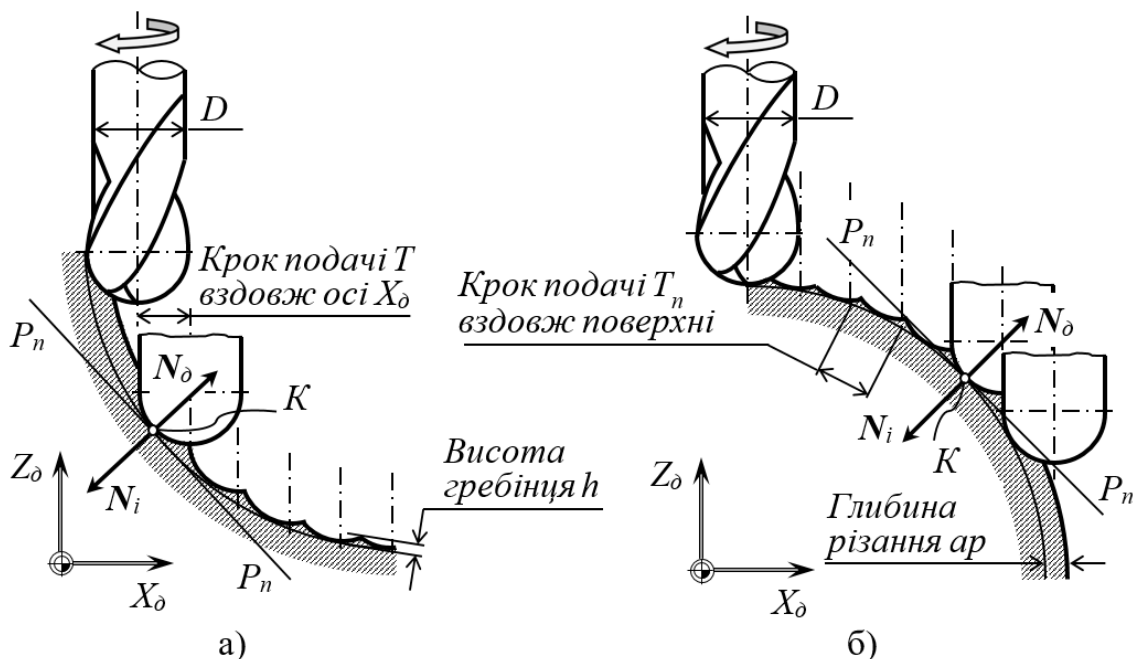


Рис. 3. Схема фрезерування з кроком подачі  $T$  вздовж осі  $X_0$  увігнутої (а) та опуклої (б) криволінійної поверхні деталі

Для обробки вертикальних поверхонь з забезпеченням стабільної якості обробки застосовується стратегія з постійним кроком  $T$  вздовж осі  $Z_0$  (рис. 4). Але присутня залежність кроку  $T_n$  по поверхні та висоти гребінця  $h$  від кута між віссю фрези та нормаллю  $N_0$  до номінальної поверхні деталі в точці контакту  $K$ .

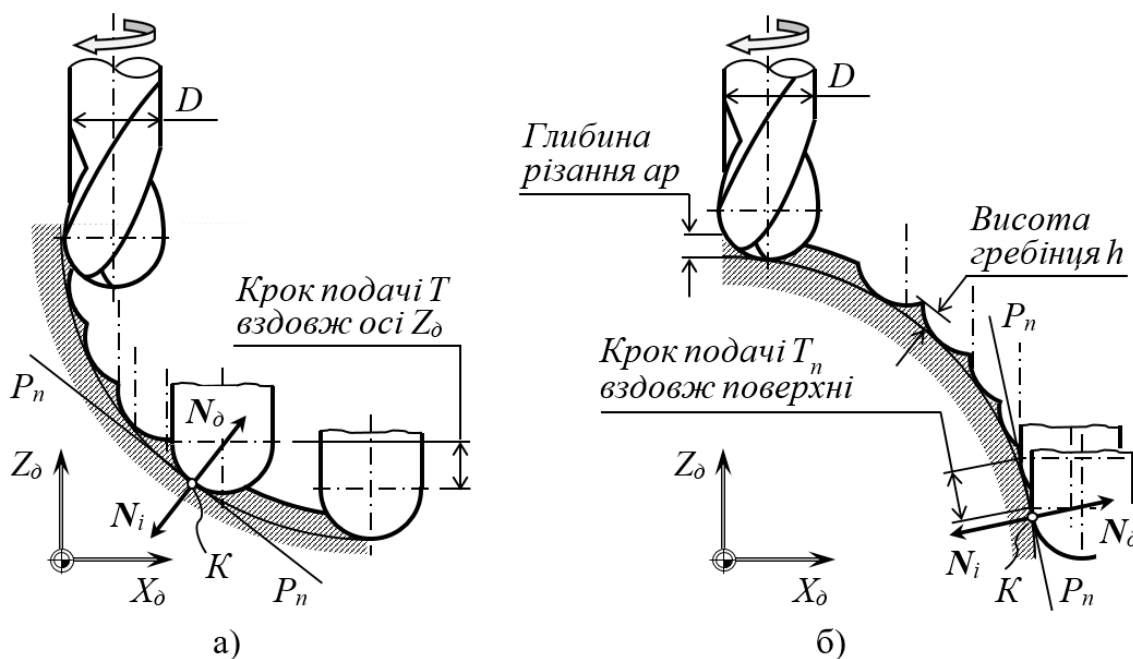


Рис. 4. Схема фрезерування з кроком подачі  $T$  вздовж осі  $Z_0$  увігнутої (а) та опуклої (б) криволінійної поверхні деталі

При виборі стратегії чистового фрезерування криволінійних поверхонь деталей основним параметром призначають висоту  $h$  залишкового гребінця для отримання бажаної шорсткості оброблюваної поверхні.

Висота  $h$  залишкового гребінця залежить від кроку подачі  $T_n$  сусідніх проходів та діаметра  $D$  робочої частини фасонної фрези і зменшується при збільшенні діаметра  $D$  фрези та зниженні кроку  $T_n$  між сусідніми проходами.

Фрезерування криволінійних фасонних поверхонь кінцевими фрезами зі сферичним торцем як і тороїдальними фрезами характеризується змінним перерізом шару оброблюваного матеріалу, переривчастим контактом різальних кромки фрези з оброблюваною поверхнею деталі та змінним ефективним діаметром  $De$  фрези який найбільший для тієї частини різальної кромки, яка знаходиться в «тілі деталі» при глибині різання  $ap$  (рис. 5).

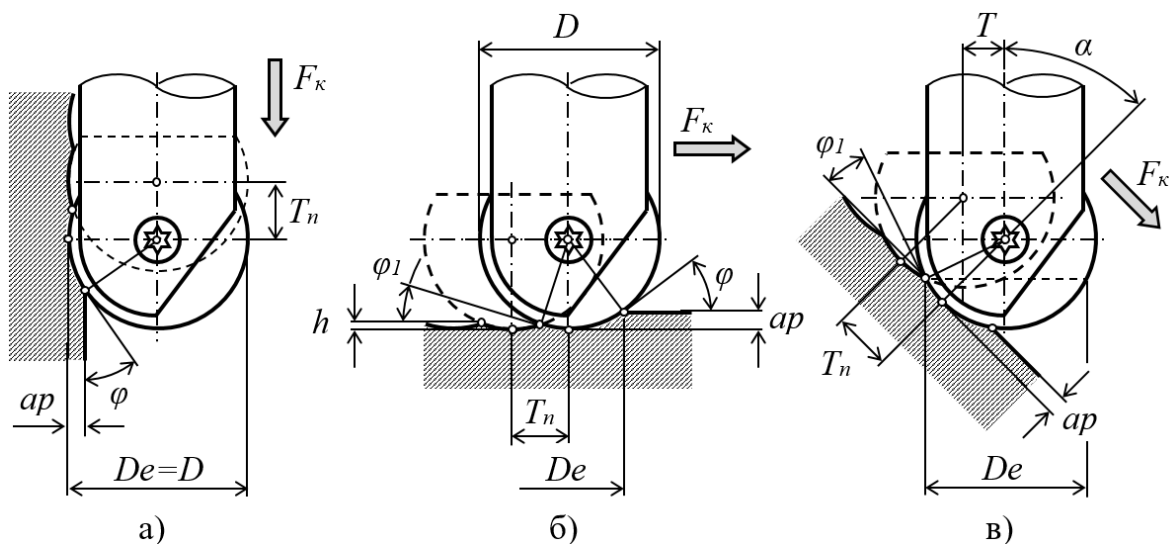


Рис. 5. Схеми фрезерування вертикальної (а), горизонтальної (б) та нахиленої (в) ділянки поверхні для розрахунку кутів у плані  $\varphi$  та  $\varphi_1$

Для кінцевих фрез з радіусною різальною кромкою властиво те, що головний кут у плані  $\varphi$  змінний від нуля при вершині фрези до величини, яка вимірюється у точці що знаходиться на різальній кромці в контакті з зовнішньою поверхнею припуску. При максимальній глибині різання  $ap$  яка дорівнює радіусу різальної кромки фрези головний кут у плані  $\varphi$  становитиме  $90^\circ$ .

Для наведених схем фрезерування (див. рис. 5) головний кут у плані  $\varphi$  в напрямку крокової подачі  $F_k$  визначається зі співвідношення:

$$\varphi = \cos^{-1} ((D - 2 \times ap)/D), \quad (1)$$

де:  $D$  – діаметр робочої частини фасонної фрези,  $ap$  – глибина різання.

Значення допоміжного кута у плані  $\varphi_1$  залежить від діаметра  $D$  робочої частини фасонної фрези і величини кроку  $T_n$  між сусідніми проходами та розраховується по формулі:

$$\varphi_1 = \sin^{-1} (T_n/D). \quad (2)$$

Різальні кромки кінцевих фрез зі сферичним торцем і тороїдальних фрез є дугою кола. Всі точки різальної кромки розташовані на різній відстані від осі фрези що зумовлює різну швидкість різання яка змінюється від нуля на вершині фрези до максимального значення для точки на ефективному діаметрі  $De$  фрези при призначеній частоті обертання шпинделя верстата. Тому для розрахунку частоти обертання шпинделя верстата треба брати до уваги саме ефективний діаметр  $De$  кінцевої фасонної фрези.

При фрезеруванні вертикальної площини (див. рис. 5, а) ефективний діаметр  $De$  фрези дорівнює номінальному діаметру  $D$  її робочої частини.

Для випадку фрезерування горизонтальної ділянки деталі (див. рис. 5, б) величина ефективного діаметра  $De$  фрези визначається таким чином:

$$De = D \times \sin \varphi. \quad (3)$$

При фрезеруванні нахиленої поверхні деталі (див. рис. 5, в) ефективний діаметр  $De$  фрези змінюється. Виробники фасонних кінцевих фрез надають рекомендації для розрахунку ефективного діаметра  $De$  та визначення частоти обертання шпинделя і висоти  $h$  залишкових гребінців з урахуванням діаметра  $D$  робочої частини фасонної фрези, кроку  $T_n$  між сусідніми проходами та глибини різання  $ap$  для випадків обробки горизонтальних та нахилених поверхонь. Докладніше інформація наведена в таблиці.

Радіусні різальні кромки кінцевих фрез контактують з матеріалом припуску деталі відносно осі фрези в напрямку крокової подачі  $F_k$  в точці  $A$  і утворюють ефективний діаметр  $De$  фрези (рис. 6). З боку обробленої поверхні різальні кромки контактують з вершиною залишкового гребінця в точці  $B$  на діаметрі  $De_1$ . При фрезеруванні горизонтальної ділянки деталі коли нормаль  $N_\delta$  до номінальної поверхні співпадає з віссю фрези (рис. 6, а) для розрахунку частоти обертання шпинделя верстата ефективний діаметр  $De$  фрези визначається формулою (3).

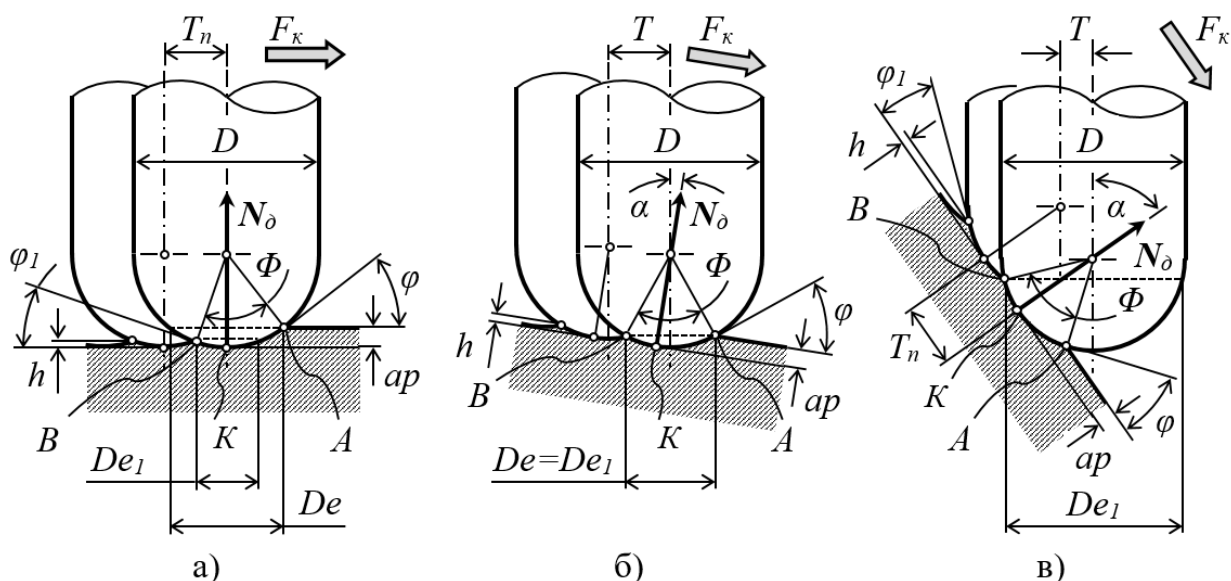


Рис. 6. Схеми фрезерування горизонтальної (а) та похилих (б, в) ділянок поверхонь для розрахунку ефективного діаметра  $De$  та  $De_1$  фрез

Рекомендації виробників фасонних фрез для призначення параметрів обробки

Ефективний діаметр $De$ при фрезеруванні горизонтальної ділянки поверхні	Ефективний діаметр $De$ при фрезеруванні похилої ділянки поверхні	Висота $h$ залишкового гребінця мікронерівностей
<b>Kennametal</b> <a href="https://www.kennametal.com/">https://www.kennametal.com/</a> <b>Widia</b> <a href="https://www.widia.com/">https://www.widia.com/</a>		
Для горизонтальних або похилих під кутом $\alpha < 10^\circ$ поверхонь $De = \sqrt{D^2 - (D - 2 \times ap)^2}$	Для поверхонь з кутом нахилу від $11^\circ$ до $55^\circ$ застосовують коефіцієнт $k$ $k = \frac{1}{\sin[\alpha + \cos^{-1}\{1 - (2 \times (ap/D))\}]}$	Немає інформації
<b>Dormer Pramet</b> <a href="https://www.dormerpramet.com/">https://www.dormerpramet.com/</a>		
Наведена таблиця для визначення $De$ залежно від діаметра $D$ фасонної фрези та глибини різання $ap$	Немає інформації	Наведені таблиці для визначення кроку $T_n$ між строками залежно від діаметра $D$ фасонної фрези та висоти $h$ гребінця
<b>Korloy</b> <a href="http://www.korloy.com/">www.korloy.com/</a>		
$De = 2 \times \sqrt{ap(D - ap)}$	$De = D \times \sin \left[ \alpha \pm \cos^{-1} \left( \frac{D - 2 \times ap}{D} \right) \right]$	Наведена таблиця для визначення шорсткості поверхні залежно від кроку $T_n$ та радіуса фрези
<b>Mitsubishi Materials</b> <a href="http://www.mmc-carbide.com/">www.mmc-carbide.com/</a>		
Наведені таблиці для визначення частоти обертання шпинделя та величини кроку $T_n$ між строками залежно від діаметра $D$ фасонної фрези та глибини різання $ap$ коли поверхня нахилена під кутом $\alpha \leq 15^\circ$ та $\alpha > 15^\circ$		$h = R \times \left[ 1 - \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{T_n}{D} \right) \right\} \right]$
<b>Guhring</b> <a href="https://guhring.com/">https://guhring.com/</a>		
$De = 2 \times \sqrt{D \times ap - ap^2}$	$De = D \times \sin \left[ \alpha + \cos^{-1} \left( \frac{D - 2 \times ap}{D} \right) \right]$	$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2 - T_n^2}{4}}$
<b>Walter</b> <a href="https://www.walter-tools.com/">https://www.walter-tools.com/</a>		
Наведені графіки для визначення $De$ залежно від діаметра $D$ фасонної фрези та глибини різання $ap$	Немає інформації	Наведена таблиця для визначення кроку $T_n$ залежно від діаметра $D$ фрези та висоти $h$ гребінця $h = 0,5 \times \left( D - \sqrt{D^2 - T_n^2} \right)$

Для прикладу виберемо кінцеву фрезу зі сферичним торцем з діаметром робочої частини  $D = 16$  мм, глибину різання  $ap$  призначимо 1,2 мм, а крок  $T_n$  між сусідніми проходами встановимо 3 мм. Головний кут у плані  $\varphi$  в напрямку крокової подачі  $F_k$  згідно з формулою (1) дорівнює  $31,8^\circ$ , а допоміжний кут у плані  $\varphi_1$  визначаємо по формулі (2) і отримуємо  $10,8^\circ$ . В цьому випадку ефективний діаметр  $De$  фрези відповідно до формули (3) становить 8,4 мм.

При фрезеруванні похилої ділянки поверхні деталі (рис. 6, б, в) яка складає кут  $\alpha$  між віссю фрези та нормаллю  $N_\delta$  до номінальної поверхні деталі в точці  $K$  контакту з різальною кромкою фрези ефективний діаметр  $De$  фрези зменшується, а діаметр  $De_1$  збільшується при зростанні кута нахилу поверхні деталі.

Для умови коли  $De > De_1$  при розрахунку ефективного діаметра формула (3) набуває вигляду:

$$De = D \times \sin(\varphi - \alpha). \quad (4)$$

Тому для встановлення оптимальної частоти обертання шпинделя верстата важливо враховувати кут  $\alpha$  нахилу ділянки криволінійної поверхні деталі, що оброблюється відносно осі кінцевої фрези.

Розрахуємо значення кута  $\alpha$  при якому діаметр  $De$  дорівнює  $De_1$  (див. рис. 6, б). Кут  $\Phi$  між радіусами сферичної частини фрези до точок  $A$  і  $B$  контакту різальної кромки з поверхнею деталі дорівнює  $\Phi = 31,8^\circ + 10,8^\circ = 42,6^\circ$ . Таким чином кут  $\alpha$  між віссю фрези та нормаллю  $N_\delta$  до номінальної поверхні деталі в точці контакту  $K$  буде дорівнювати  $\alpha = 31,8^\circ - 21,3^\circ = 10,5^\circ$ . За таких призначених параметрів маємо  $De = De_1 = 5,8$  мм.

Якщо кут  $\alpha$  буде більшим, то для призначення частоти обертання шпинделя потрібно використовувати ефективний діаметр  $De_1$  фрези. При подальшому збільшенні кута  $\alpha$  діаметр  $De_1$  фрези визначається формулою:

$$De_1 = D \times \sin(\varphi_1 + \alpha). \quad (5)$$

Максимальне значення ефективного діаметра  $De_1$  фрези дорівнює номінальному діаметру  $D$  її робочої частини за умови коли  $\alpha + \varphi_1 = 90^\circ$ .

Коли кут  $\alpha$  для наведених параметрів процесу обробки, наприклад дорівнює  $55^\circ$  (див. рис. 6, в) то скориставшись вказаною формулою (5) отримуємо значення ефективного діаметра  $De_1 = 14,6$  мм.

Для тороїдальних фрез діаметр кутової різальної кромки або діаметр круглої пластини суттєво менше діаметра фрези і при розрахунку частоти обертання шпинделя можна використовувати діаметр  $D$  робочої частини фрези.

Зменшення кроку  $T_n$  між сусідніми проходами вздовж профіля та збільшення діаметра  $D$  робочої частини фасонної фрези призводить до зменшення висоти  $h$  залишкових гребінців та поліпшення мікрогеометрії оброблюваної поверхні. Висота  $h$  залишкових гребінців розраховується з виразу:

$$h = (D/2) \times (1 - \cos \varphi_1). \quad (6)$$

Для поданого прикладу висота  $h$  залишкових гребінців дорівнює 0,14 мм.

При чистовому фрезеруванні основним показником якості обробленої поверхні є висота  $h$  залишкових гребінців і тому допоміжний кут у плані  $\varphi_1$  може бути визначений так:

$$\varphi_1 = \cos^{-1} (D - 2 \times h) / D. \quad (7)$$

У свою чергу крок  $T_n$  між сусідніми проходами вздовж профіля для бажаної висоти  $h$  профілю мікронерівностей отримуємо з формули:

$$T_n = D \times \sin \varphi_1. \quad (8)$$

Наприклад, при бажаній висоті залишкових гребінців  $h = 0,01$  мм допоміжний кут у плані  $\varphi_1$  дорівнює  $2,9^\circ$ , а крок між сусідніми проходами вздовж профіля деталі що обробляється  $T_n = 0,8$  мм.

**Висновки.** Отримані результати дають можливість розраховувати ефективний діаметр  $De$  та  $De_1$  кінцевої фрези зі сферичним торцем при обробці криволінійних фасонних поверхонь для випадків коли нормаль  $N_o$  до номінальної поверхні деталі в точці  $K$  контакту з різальною кромкою фрези нахилена під кутом  $\alpha$  до осі фрези.

Цією рекомендацією слід керуватися технологам при призначенні частоти обертання шпинделя верстата, що дозволить вести фрезерування криволінійних фасонних 3D поверхонь деталей з максимальною продуктивністю та зменшить зношування різальних кромek фрез в процесі різання.

Для отримання поверхні з мінімальним значенням шорсткості потрібно застосовувати фасонні кінцеві фрези з найбільшим можливим діаметром  $D$  робочої частини та максимальним числом різальних кромek, а також мінімізувати подачу і крок  $T_n$  між рядками сусідніх проходів.

#### Перелік посилань

1. Кальченко, В., Кологойда, А., Пасов, Г., Сіра, Н., Зюзько, Д., & Пивовар, Д (2023). Сучасні 3d-технології в машинобудуванні та автомобільному транспорті. *Технічні науки та технології : науковий журнал*, 2(32) 33–41. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-33-41](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-33-41)
2. Petitcuenot, M., Pierre, L., & Anselmetti, B. (2015). ISO Specifications of Complex Surfaces: Application on Aerodynamic Profiles. *Procedia CIRP*, 27, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.037>
3. ASME Y14.41-2019: Digital Product Definition Data Practices: Engineering Drawing and Related Documentation Practices.
4. Шорнікова, С. В. (2022). Шорсткість поверхні як одна із основних геометричних характеристик якості поверхні деталей. методи та засоби контролю. *Таврійський Науковий Вісник. Серія: Технічні Науки*, (5), 13–20. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.2>
5. Петраков, Ю. В. (2025). *Управління процесами різання на верстатах з ЧПК: монографія*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка».
6. Внуков, Ю. М., Логомінов, В. О., & Каморкін, П. А. (2012). Особливості кінцевого фрезерування маложорстких деталей типу «затиснених пластин». Частина 2. Вплив швидкості різання при кінцевому циліндричному фрезеруванні маложорсткої деталі на формування значень примусової сили (сили віджимання маложорсткої деталі). *Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць*, 7, 32–51.
7. Liu, H., Zhang, E., Sun, R., Gao, W., & Fu, Z. (2022). Free-Form Surface Partitioning and Simulation Verification Based on Surface Curvature. *Micromachines*, 13, 2163. <https://doi.org/10.3390/mi13122163>.

8. Varga, J., Spišák, E., Gajdoš, I., & Mulidrán, P. (2022) Comparison of Milling Strategies in the Production of Shaped Surfaces. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16 (6), 267–274. <https://doi.org/10.12913/22998624/156817>.

### ABSTRACT

**Purpose.** Theoretical study of the conditions of contact of the cutting edges of ball nose end mills with a curved surface of parts during milling on computer numerically controlled (CNC) machines, determining the effective diameter of the cutting edge when machining sections of shaped surfaces that are inclined relative to the milling cutter axis, and evaluation of the influence of processing parameters on the size of surface micro-irregularities of the processed surface.

**The methods.** The study is based on the use of analytical geometry methods in studying the theoretical geometric model of contact of ball nose end mills with curvilinear shaped surfaces of parts and the influence of machining process parameters on the micro-irregularities of shaped surfaces.

**Findings.** The relationship between the effective diameter of the milling cutter and the diameter of the working part of the shaped milling cutter, the depth of cut, the pitch between adjacent passes, and the angle between the cutter axis and the normal to the nominal surface of the part has been established. The obtained dependencies of the residual scallop height on the machined shaped surfaces on the cutter diameter and the pitch between adjacent passes make it possible to assign processing parameters for curved surfaces of parts while ensuring a given surface roughness.

**The originality.** Functional dependencies were determined for calculating the effective diameter of the cutting edge of an ball nose end mills when milling sections of shaped surfaces that are inclined relative to the mill axis, and formulas were obtained for determining the residual scallop height.

**Practical implementation.** Processing curved surfaces of parts, taking into account the angle of inclination between the milling cutter axis and the normal to the nominal surface of the part at the point of their contact, allows processing parts of proper quality and accuracy with minimal costs. The given formulas for calculating the effective diameter on the cutting edge of the ball nose end mills allow the technologist to assign an appropriate spindle speed when assigning the optimal cutting speed for the given milling conditions, which recommended by the tool manufacturer.

**Keywords:** *curved surface, ball end mill, radius cutting edge, effective cutter diameter, surface roughness, scallop height, form-generation strategy.*

дата першого надходження статті до видання	10.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	21.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026